

## 首钢转炉—连铸轴承钢的研制与开发

张慧峰 邓素怀 张玮 王坤 林志峰

(首钢技术研究院 100041 北京)

**摘要:** 通过对转炉终点、LF 炉精炼、VD 真空处理及全保护连铸的严格控制等环节, 首钢生产的轴承钢满足了 GB18254-2002 的标准要求, 得到了用户的认可。

**关键词:** 轴承钢; 转炉; 氧含量

中图分类号: TF762 + .4 文献标识码: B 文章编号: 1674-0971(2008)03-036-05

### Research and Development of Bearing Steel Produced by Converter + Continuous casting Process in Shougang

Zhang Huifeng Deng Suhuai Zhang Wei Wang kun Lin Zhifeng

(Shougang Research Institute of Technology, 100041, Beijing)

**Abstract:** This paper introduces the key processes of bearing steel produced by converter route in Shougang. With the strict control links such as termination of converter, ladle furnace refining, vacuum handling and whole protected casting, and so on, the products produced by Shougang have met the standard requirements of GB18254-2002 and have been approved by customers.

**Key Words:** Bearing steel, Converter, Oxygen content

## 引言

轴承钢是特殊钢中重要的钢种之一, 其主要代表钢种为高碳铬轴承钢 GCr15。传统的生产工艺路线是电炉—模铸生产, 但随着连铸及精炼技术的发展, 电炉—连铸工艺及转炉—连铸工艺生产轴承钢的厂家越来越多。并且试验证明, 转炉连铸生产的轴承钢其疲劳寿命并不低于其它工艺。但转炉—连铸生产的轴承钢成本却有较大的优势, 因此 2003 年到 2006 年间首钢开始进行了轴承钢的冶炼开发。现在首钢轴承钢已达到批量生产, 产品质量达到了国内同行水平, 受到了用户的好评。

## 1 生产工艺及设备

轴承钢在首钢三炼钢—高线精棒车间进行生产, 主要生产工艺路线是:

首钢三炼钢 80 t 顶吹转炉 → 80 t LF 钢包精炼炉 → VD 真空处理 → 全自动全保护连铸 (200 × 200 mm) → 铸坯缓冷 → 铸坯检查 → 步进式加热炉 → 20 架控轧控冷轧制 → 分段剪切 → 打捆称重 → 轧材缓冷 → 检查出库

### 1.1 转炉

原料主要采用高炉铁水, 在三炼钢转炉冶炼。采用 Al 强脱氧, 挡渣锥挡渣出钢; 为控制钢水磷含量, 转炉采用双渣操作, 提高前期脱磷效果, 控制 P 含量平均在 0.010%, 范围在 0.003% ~ 0.016% 之间。

转炉要求适当提高终点碳含量及减少后吹, 因为低的终点碳及过多的后吹, 大大提高了转炉钢水氧含量。虽然通过 Al 脱氧降低了钢水氧活度, 但大量的脱氧产物弥散在钢液中, 如不能很好排出, 势必增加钢中夹杂物, 提高了钢材的全氧含量。

### 1.2 LF 炉精炼

转炉出钢加铬铁、碳粉等进行脱氧合金化后进入 LF 钢包炉精炼。LF 炉采用氩气搅拌、高碱度低氧化性渣精炼, 目标及主要任务就是去除钢中的夹杂物, 降低氧含量, 降低硫含量; 调整钢水成分和温度, 为 VD 炉和连铸做准备。

炉渣的性能对提高钢的洁净度十分重要。CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 比值、渣碱度、流动性以及氧活度均对洁净度有直接影响。为了去除轴承钢中的主要夹杂物 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 必须控制炉渣的成分。炉渣对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的吸收能力可通过降低 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的活度, 降低炉渣的熔点,

促进  $Al_2O_3$  的物质传递而得到提高。故此在实际生产应用中产生了两种截然不同的渣系,国外一些钢厂如日本山阳采用的渣系见表1<sup>[1]</sup>,倾向于高碱度(大于4.0),低  $Al_2O_3$  操作,以提高LF炉脱硫脱氧效率。 $MgO$  一般控制较低,因为  $MgO$  一旦大于10%,炉渣流动性变差,不利于吸收  $Al_2O_3$  夹杂。这样的渣系一般需要添加较多的  $CaF_2$ ,以提高炉渣流动性。而国内一些科研院所及钢厂进行了较多的低碱度渣的研究,且控制  $CaO/Al_2O_3$  的比值,控制炉渣流动性,促进  $Al_2O_3$  的吸收为主要目的。但这一般要求在精炼工序前进行铁水预处理,降低初始硫含量,减轻LF炉的脱硫任务。

兴澄特钢采用的炉渣成分<sup>[2]</sup>见表2,从中看到,也是采用高碱度炉渣路线,但  $Al_2O_3$  有所提高,目的是为了控制  $CaO/Al_2O_3$  的比值,降低炉渣的熔点。

表1 山阳轴承钢高碱度渣实例

Table 1 Example of high basic slag for bearing steel manufactured in ShanYang

成分	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO
含量 %	57.8	13.3	15.8	4.3

表2 兴澄特钢轴承钢精炼渣成分

Table 2 Chemical constitution of refining slag for bearing steel manufactured in Xingcheng Special Steel Company

成分	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO
含量 %	50~60	8~12	20~30	5~8

结合首钢实际,钢水初始硫含量较高,没有铁水预处理,LF炉采用高碱度渣的操作路线,降低  $Al_2O_3$  含量,以降低炉渣中  $Al_2O_3$  活度。同时进一步研究炉渣的扩散脱氧,降低渣中  $FeO$  含量。

### 1.3 VD 真空处理

精炼结束进行VD真空脱气处理,VD炉的主要功能是去除氢、氮等气体,进一步降低钢中夹杂物含量。现在VD真空处理已经基本顺利,蒸汽良好的情况下,5~6 min 就可以达到深真空(100 Pa 以下),并保持在10 min 或是更长时间。对氩气流量,需根据钢水沸腾情况调节,一般控制在100 NL/min ~ 200 NL/min。

### 1.4 连铸

轴承钢采用的是达涅立公司设计的4流全自动矩形坯连铸机,坯型200×200 mm。整个浇注过程采用全保护浇注自动控制,结晶器电磁搅拌。连铸采用

低拉速浇注,拉速现一般控制在1.1~1.4 m/min;过热度控制在35 ℃以下。

生产的铸坯高温进入铸坯缓冷坑缓冷,目的是降低铸坯的氢含量,释放铸坯应力。铸坯检查后运送到高线厂精棒车间进行轧制。

### 1.5 轧制

采用全连续轧制工艺,最高轧制速度为16 m/s。主轧线配置20架轧机:全部为高刚度短应力线轧机,并呈平立交替布置。全线轧机分为粗轧机组、中轧机组、预精轧机组、精轧机组;轧机均为直流电机单独传动。

主要直条产品规格为Φ14.0~80.0 mm的热轧直条圆钢,轧制结束后,分段剪切称重入缓冷罩进行轧材缓冷。缓冷的目的也是为降低轧制应力及钢中气体含量,保证轧材的低倍质量。

轧制过程主要进行碳化物、脱碳层及表面质量的控制,其中碳化物的控制是控制重点,尤其是碳化物的液析和碳化物网状级别的控制。碳化物除与铸坯偏析有较大的影响外,加热工艺对碳化物的级别影响较大。首先通过加热炉黑匣子试验对加热炉的运行情况进行了详细的了解,制定了加热炉各段的控制工艺,以综合平衡脱碳、碳化物级别及防止铸坯裂纹等各个方面。但对碳化物的控制来说,高温扩散需要的加热时间显得更为重要,对一段时期的不同加热时间条件下,轧材碳化物液析进行了统计分析,分析结果见图1。

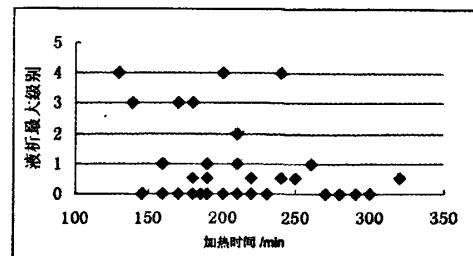


图1 加热时间与液析级别关系

Fig. 1 Relation between heating time and carbide liquation grades

从图上可以看出,加热时间的长短对碳化物液析有重要的影响。当加热时间低于200 min时,碳化物液析容易超标,最高达到4级。加热时间越长,液析的级别也越轻。

同样,网状碳化物级别随着加热时间的延长也有所降低。另外对网状碳化物,控轧控冷工艺也起着重要的作用。相关文献均指出,通过低温精轧和

轧后快冷的方式可以将碳化物网状控制在较低的级别。根据首钢现有设备条件,首钢采取轧机间冷却+轧后冷却相结合的方式,将精轧温度控制在单相奥氏体低温区,避免精轧温度过低对轧辊的磨损,降低轧机负荷。同时进行相应的轧后冷却,抑制网状碳化物的析出。

## 2 产品质量

### 2.1 氧含量

氧含量平均 11 ppm,  $\leq 12$  ppm 的批次达 100%,  $\leq 10$  ppm 的批次达 33%, 满足了用户要求。

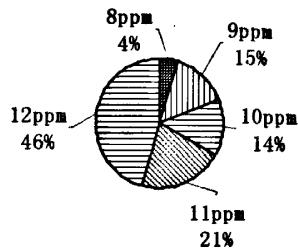


图 2 氧含量分布情况

Fig. 2 Distribution of oxygen content

图 3 为 Al 含量与氧含量的散点图, 以分析钢中 Al 和氧含量的关系。从图 3 中看, 关联性不是非常明显, 但 Al 含量在 0.025% 以下时, 氧含量偏高的批次增加。

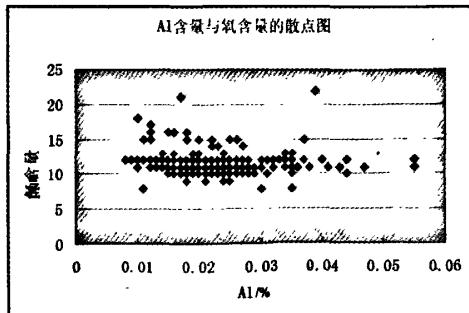


图 3 钢中 Al 含量与氧的关系

Fig. 3 Relation between Al content and oxygen in steel

### 2.2 成分

成分控制较好, P 含量偏高平均 0.012%, S 含量平均 0.007%; 平均碳含量 0.98%, C 含量在 0.97% ~ 0.99% 之间(即  $0.98\% \pm 0.01$ )占 83.6% 的比例;

表 3 为成品成分统计情况, 成分控制较好, 平均碳含量 0.98%, C 含量在 0.97% ~ 0.99% 之间

表 3 成品成分统计情况

Table 3 Statistical results of chemical constitutions of products

%	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Ca
平均值	0.98	0.23	0.33	0.012	0.007	1.48	0.022	0.0009
最大值	1.03	0.31	0.38	0.021	0.019	1.63	0.055	0.0017
最小值	0.95	0.20	0.29	0.006	0.001	1.40	0.008	0.0004

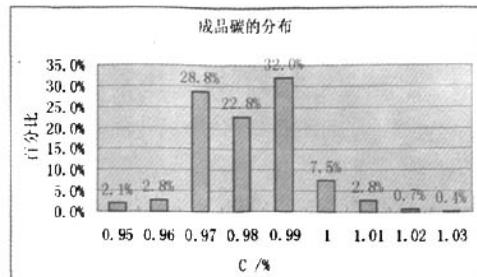


图 4 成品碳的分布

Fig. 4 Distribution of carbon in product  
(即  $0.98 \pm 0.01$ ) 占 83.6% 的比例, 如图 4。

### 2.3 脱碳层深度

加热炉温度和炉内气氛控制较好, 总体脱碳层深度较浅, 范围在 0 ~ 0.3 mm, 平均 0.10 mm, 未有超标情况。

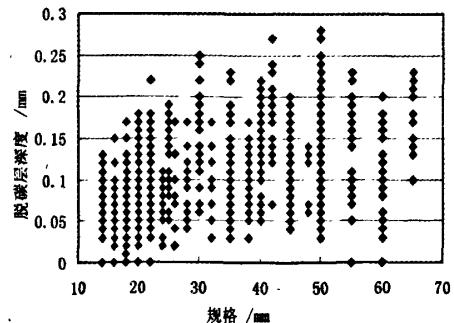


图 5 规格与脱碳层深度关系

Fig. 5 Relation between the specification and practical decarburized depth

### 2.4 带状及液析水平

碳化物带状、液析级别主要通过合理的加热制度来进行控制, 带状级别在 0 ~ 2.0 级, 平均 0.3 级; 液析级别平均 0.3 级, 控制较好, 如图 6、图 7。

### 2.5 碳化物网状

小规格轴承钢 ( $\varnothing \leq 25$  mm) 一般用于轴承滚动体使用, 退火材要求网状碳化物小于 2.5 级。热轧材对网状碳化物无要求, 但用户希望控制在 3.0 级

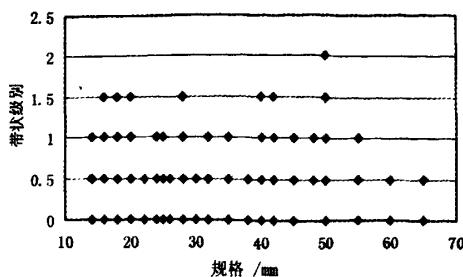


图 6 带状级别分布情况

Fig.6 Distribution condition of banded carbide

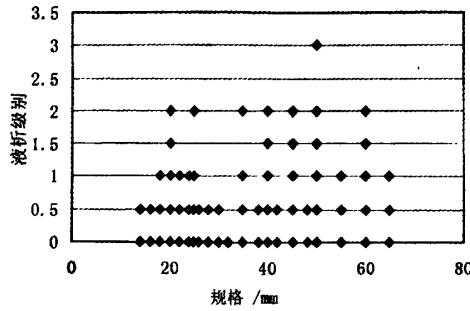


图 7 碳化物液析分布情况

Fig.7 Distribution of carbide liquation

以下,以降低球化退火的负担。通过控轧控冷工艺,碳化物网状级别平均 1.6 级,具体分布情况如图 8,83.5% 的试样网状碳化物级别达到 3.0 以下。

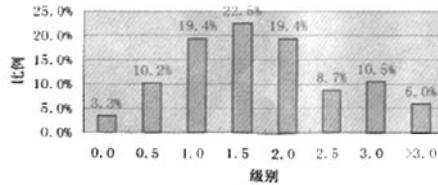


图 8 网状碳化物分布情况

Fig.8 Distribution of net carbide

表 4 非金属夹杂物级别

Table 4 Ratings of non-metallic inclusion

	非金属夹杂物类型					平均值	0.52	0.25
	A类		B类		C类			
	细系	细系	细系	细系	细系			
平均值	0.68	0.33	0.19	0.03	0	0	0.52	0.25
最大	1.5	1	2	1	0	0	1	1
最小	0	0	0	0	0	0	0	0

## 2.6 夹杂物

表 4 为夹杂物平均控制情况,整体上轴承钢夹杂物控制较好。夹杂物尤其是 B 类夹杂物对轴承钢

疲劳寿命影响较大。下图 9 为 B 类细系夹杂物的分布情况,B 类细系夹杂物级别平均 0.19 级,88.3% 的批次在 0.5 级以下。

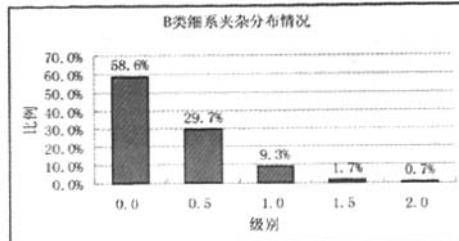


图 9 B 类细系夹杂物分布

Fig.9 Distribution of type B thin series inclusion

## 3 轴承疲劳寿命的测定

首钢轴承钢主要用于轴承套圈和滚动体,而接触疲劳寿命是评价用户使用的最终指标。为了解轴承钢的实物质量水平,在洛阳轴承研究所进行了接触疲劳寿命对比检测。试样选用 Ø60 mm 轴承钢棒材,同时选用国内 A 厂的两组实物进行对比,试样制成 D8206 球轴承,采用 TLP 接触疲劳试验机组检测,试验组数 16 组。首钢轴承钢标为 1#,A 厂两组轴承钢标为 2# 和 3#。

表 5 三组试样的接触疲劳寿命 P—N 曲线参数估计结果

Table 5 Estimate parameter result of P—N curve of contact fatigue life of three test samples

组号	斜率 b	Vs × 10 <sup>7</sup>	L <sub>10</sub>		L <sub>50</sub>	
			比率 × 10 <sup>7</sup>	比率 × 10 <sup>7</sup>	比率 × 10 <sup>7</sup>	比率
1#	1.9935	4.0839	1.55	1.3208	2.57	3.3980 1.68
2#	1.3748	2.6382	1	0.5134	1	2.0209 1
3#	1.7586	5.3028	2.01	1.4750	2.87	4.3052 2.13

滚动接触疲劳寿命服从两参数韦布尔函数,其表达式如下:

$$P(N)_s = 1 - e^{-(\frac{N}{Vs})^b} \quad (1)$$

式中:P(N)<sub>s</sub>—表示在某一试验应力水平 S 下,试样寿命小于 N 的概率,%;

b—韦布尔分布的斜率参数;

N—试样寿命,应力循环次数;

V<sub>s</sub>—韦布尔分布的特征寿命,即失效概率为 63.2% 时的疲劳寿命。

韦布尔分布函数的两个参数 b 和 V<sub>s</sub>,采用最佳线性不变估计方法进行数据处理,其最终三组试样的接触疲劳寿命 P—N 曲线参数估计结果见表 5,

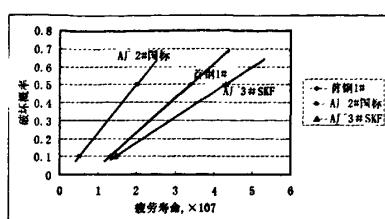


图 10 三组试样的接触疲劳寿命 P—N 曲线

Fig. 10 P—N curve of contact fatigue life of three test samples

P—N 曲线见图 10。

试验表明首钢 1# 试样的 L10(额定寿命)、L50(中值寿命)和  $V_s$ (特征寿命)均略低于某厂 3# 试样, 1# 试样和 3# 试样的 L10(额定寿命)、L50(中值寿命)和  $V_s$ (特征寿命)均远远高于某厂 2# 试样。

而 3# 试样为国际 SKF 标准生产, 某厂与首钢一样采用 GB18254—2002 标准生产。这说明首钢轴承钢实物已达到国内中上等水平。

#### 4 结论

首钢采用转炉—连铸工艺生产轴承钢, 可以满足 GB18254—2002 的标准要求, 其主要指标氧含量可以控制在 12 ppm 以下, 现在已批量生产, 产品质量受到了用户的好评。同时通过轴承接触疲劳寿命的测定对比, 表明首钢轴承钢实物已达到国内中上等水平。

#### 参考文献

- [1] 钟顺思等. 轴承钢, 冶金工业出版社, 2002 年, 162。
- [2] 刘昊. UHP EAF—LF—VD—CCM 轴承钢氧含量的控制. 江苏冶金, 2002 年 30 卷第 4 期, 22。

(上接第 26 页)

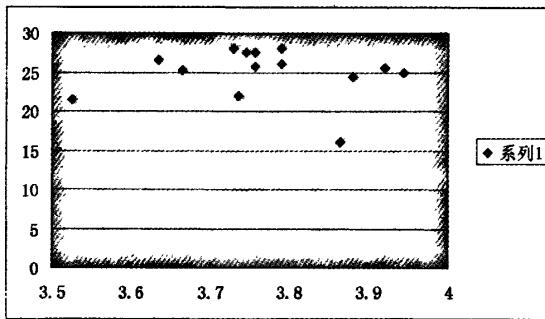
图 6  $(Al + Ti) \%$  含量与  $\delta_s$  的关系

Fig. 6 Relationship between  $(Al + Ti) \%$  and  $\delta_s$

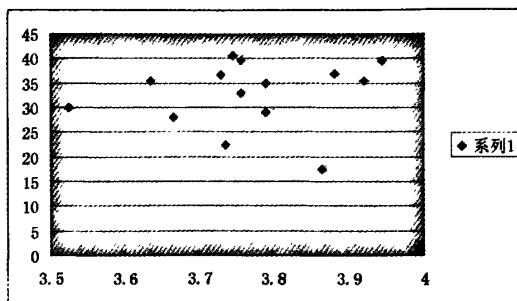
图 7  $(Al + Ti) \%$  含量与  $\psi$  的关系

Fig. 7 Relationship between  $(Al + Ti) \%$  and  $\psi$

可采用图 2 的结论, 即增加冷却强度, 以得到细小弥散分布的  $\gamma'$  相, 强化  $\gamma'$  相对晶粒长大的阻碍作用。

#### 4 结论

4.1 N80A 合金的强度指标随  $\gamma'$  相的数量增加而提高,  $\gamma'$  相的数量又受合金中  $(Al + Ti) \%$  含量的影响。可以控制  $(Al + Ti) \%$  含量来使 N80A 的强度性能达到预想。

4.2 随着 N80A 合金中  $\gamma'$  相数量增加, N80A 合金的晶粒呈细化倾向。

#### 参考文献

- [1] 黄乾光, 李汉康. 高温合金, 冶金工业出版社
- [2] 付书红, 董建新, 张麦仓, 谢锡善. 改型 GH4169 合金的研究. 第十一届高温合金论文集
- [3] 刘建涛, 胡本英, 刘国权, 张义文, 邱宇. FGH4096 合金在控制冷却过程中  $\gamma'$  相析出行为研究. 第十一届高温合金论文集

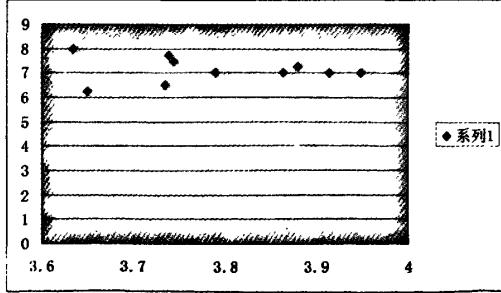
图 8  $(Al + Ti) \%$  含量与晶粒度的关系

Fig. 8 Relationship between  $(Al + Ti) \%$  and grain size

的晶粒度呈细化趋势。因为  $(Al + Ti) \%$  含量的增加导致  $\gamma'$  相析出数量增加, 大量的  $\gamma'$  相分布在晶界阻碍了晶粒的长大倾向。

在 N80A 合金试制时出现过晶粒粗大不均的问题, 由表 3 可看出我们在晶粒度控制方面的差距。为得到细小均匀的晶粒, 在增加  $\gamma'$  相析出数量以外,